

# 末次间冰期-冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义\*

徐树建<sup>1,2</sup> 潘保田<sup>1</sup> 高红山<sup>1</sup> 王均平<sup>1</sup> 管清玉<sup>1</sup> 胡春生<sup>1</sup>

(1 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室,兰州 730000)

(2 临沂师范学院地理与旅游学院,山东临沂 276005)

**摘要** 采用粒级-标准偏差方法对黄土高原西部、河西走廊及河南西部等 6 个剖面末次间冰期-冰期旋回的黄土-古土壤粒度进行了系统分析,提取了对环境变化敏感的粒度组分。各剖面的环境敏感粒度组分主要分为粗细两个组分,并显示出一定的区域性差异和不同的沉积学意义。敏感组分主要受物源和沉积后成壤作用的影响:冰沟和罗家湾剖面可能受源区的影响更大而使敏感组分偏粗,暖河湾和扣马剖面可能由于后期风化的影响较大而使敏感组分偏细。对扣马剖面末次冰期旋回堆积的  $L_1$  和  $S_1$  的粒级-标准偏差分析表明  $L_1$  的敏感组分与全剖面相似;而  $S_1$  的敏感组分与全剖面存在较大差异,可能与成壤作用有关。

**关键词** 粒度;敏感组分;风成沉积;末次间冰期-冰期旋回

**中图分类号** S159 **文献标识码** A

沉积物粒度分析是研究沉积环境、沉积过程和搬运机制的重要手段之一<sup>[1,2]</sup>,粒度分析已成功应用于风成沉积、海洋、湖泊、河流和浊流沉积环境及土壤学的研究中<sup>[3~10]</sup>。中国黄土以其分布广泛、沉积连续、蕴含环境信息丰富而与深海沉积物、极地冰芯并称为全球变化研究的三大支柱,国内外研究者运用多学科的研究方法,揭示了更新世甚至中新世以来气候变化的历史<sup>[11~17]</sup>。黄土-古土壤序列所包含的古气候信息,为探讨亚洲内陆干旱化的历史和进程、亚洲季风的形成和演化、青藏高原的隆升和环境效应以及地球环境各圈层的相互作用等提供了重要的依据。

粒度数据的分析方法的运用直接影响到结果的正确与否和动力学机制的解释。研究表明,现代与地质历史时期的沉积物往往是由不同物源或沉积动力过程的组合,用全样的粒度参数只能近似地作为沉积环境的代用指标<sup>[6]</sup>。国内许多学者运用数学方法对指示冬季风强度的敏感指标进行了研究,提出了  $>30\ \mu\text{m}$ 、 $>40\ \mu\text{m}$  的百分含量是黄土高原不同地区的敏感指标<sup>[15,18]</sup>;刘东生<sup>[19]</sup>在研究洛川黄土剖面时,使用了粗粉砂(0.05~0.01 mm)和粘粒( $<0.005\ \text{mm}$ )的比值,旨在反映风尘堆积物中基本粒组与挟持粒组

的比例关系;丁仲礼<sup>[20]</sup>在调制宝鸡剖面的时间标尺时,使用了  $<2\ \mu\text{m}/>10\ \mu\text{m}$  的比值曲线作为古气候代用曲线,指示冬季风的强度。这样的比值在剖面图中可能波动的幅度更大,被认为是更敏感的指标。尽管运用粒度资料对沉积环境的分析存在多解性,但粒度分析及其派生的一系列方法作为对沉积物机械组成特征的概略表示,其作用是无论如何也不可忽视的<sup>[21]</sup>。

随着对古环境定量研究的深入,如何从多峰的粒度频率分布曲线中分离出单一的粒度组分的特征(如众数、不同粒级的体积或质量百分含量),如何从沉积物粒度时空分布的研究中提取敏感的环境替代指标,进而探讨粒度指标的沉积学意义,成为古环境研究中的关键。目前对沉积物粒度分布进行多组分分离的数学方法包括以 Weibull 函数为拟合函数<sup>[7]</sup>、利用端元粒度模型<sup>[6]</sup>和粒级-标准偏差变化<sup>[3,4,22]</sup>来计算粒度组分的个数和分布范围。依据沉积物粒度分布的含量来追索沉积物的搬运过程已在阿拉伯海和南中国海得到成功应用<sup>[6,22]</sup>,并已经用于黄土沉积。整个沉积序列所包含的粒度组分并不都在单个样品中表现为明显的峰值,所以从单个样品的粒度分布曲线上很难确定沉积物总体所包含的粒度组

\* 国家自然科学基金项目“晋陕峡谷段黄河发育历史研究”(40471016)、“渭河上游水系形成与河流阶地研究”(40401007)、教育部高等学校博士点科研基金项目“石羊河流域晚更新世以来流域地貌对构造/气候事件的不同响应研究”(20030730017)资助

作者简介:徐树建(1967~),男,山东临沂人,副教授,博士,主要从事沉积物粒度与环境变化研究。E-mail: xushujian1967@163.com

收稿日期:2005-02-24;收到修改稿日期:2005-07-20

分的个数,这就要求从沉积物总体中提取对沉积环境变化敏感的粒度组分。孙有斌等<sup>[3]</sup>用端元粒度模型和粒级-标准偏差变化两种方法分别计算了边缘海冲绳海槽和琉球海沟的重力柱样品,发现获得的粒度组分的个数相同。采用粒级-标准偏差变化算法在海洋沉积中得到较多的运用<sup>[3,4]</sup>,而在风成沉积研究中尚不多见。

在表示粒度特征的指标中,粒度频率曲线能更直观准确地反映其所包含的粒度组分信息,可进一步获得不同组分的分布范围和相对含量,从而追查各沉积组分对应的物质来源和搬运方式<sup>[3,22,23]</sup>。

标准偏差是反映数据离散趋势最常用的一个重要指标。标准偏差越大,说明观测值的变异程度越大;标准偏差越小,说明观测值的离散程度愈小,均数的代表性也就愈好。通过粒度实验分析可以获得

剖面各粒级的体积百分含量,然后计算其标准偏差,并以对数粒级为横坐标,以标准偏差为纵坐标作粒级-标准偏差图,就可以了解各粒级所对应的体积百分含量变异程度的大小,某一粒级所对应的标准偏差越大,说明产生该粒级的沉积动力或沉积过程等环境变化越大,从而可以获得不同粒级的环境敏感粒度组分。

## 1 材料与方法

粒度分析的样品主要来自黄土高原西部等地的末次间冰期-冰期旋回沉积的黄土与古土壤(L<sub>1</sub>和S<sub>1</sub>)。样点的分布与概况如表1和图1。剖面中L<sub>1</sub>和S<sub>1</sub>地层的确定是根据热释光(TL)、光释光(OSL)年代学研究和地层对比等方法<sup>[13,17]</sup>。采样间距为5 cm。

表1 采样剖面概况

Table 1 General situation of the sampling site

样点 Sampling site	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)	厚度 Thickness (cm)	层次 Layer (cm)
沙沟 Shagou	37°33'08" N	105°49'02" E	2 225	4 000	125 ~ 4 125
冰沟 Binggou	37°23'32" N	105°02'50" E	1 568	1 135	100 ~ 1 235
罗家湾 Luojiawan	36°32'46" N	104°39'02" E	1 466	4 300	250 ~ 4 550
沙金坪 Shajinping	36°03'48" N	103°55'08" E	1 518	1 955	245 ~ 2 200
暖和湾 Nuanhuowan	34°33'03" N	105°40'26" E	1 204	1 150	100 ~ 1 250
扣马 Kouma	34°47'12" N	112°46'08" E	350	1 400	40 ~ 1 440

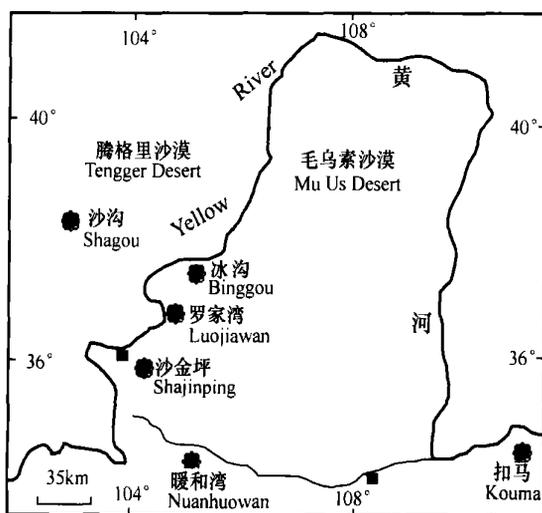


图1 样点位置与分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites and distribution of sampling points

黄土样品粒度测量的前处理方法<sup>[24]</sup>:在每个样品中取0.3~0.5 g土样放入烧杯中,加入双氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>),煮沸至完全去除有机质。然后加入稀盐酸

煮沸除去碳酸盐,再加蒸馏水注满烧杯。静置12 h后,用橡皮管抽去上层水,以去掉Ca<sup>2+</sup>、H<sup>+</sup>等絮凝性较强的离子,注意抽水过程中尽可能不要扰动下层已沉积的颗粒,然后加入10 ml浓度0.05 mol L<sup>-1</sup>的六偏磷酸钠(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>作为分散剂,在超声波振荡仪上振荡7 min。所采用的粒度仪为英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000激光粒度仪,仪器测量范围为0.02~2 000 μm。通过对沙金坪剖面800 cm处的同一黄土样品的20次重复测试结果表明,其平均粒径的标准偏差为0.505,相对标准偏差为2.38%;其中值粒径的标准偏差为0.452,相对标准偏差为2.36%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境敏感粒度组分的空间分异

对宁夏中卫冰沟、甘肃武威沙沟、靖远罗家湾、兰州沙金坪、天水暖和湾、河南偃师扣马剖面末次间冰期-冰期的黄土与古土壤进行了粒级-标准偏差

分析,结果见图 2。其曲线的变化趋势具有明显的相似性,主要呈双峰分布,即可分为粗、细两个环境敏感粒度组分。峰值说明该粒级的标准偏差大,样品在该粒度之间的差别大,其对应的粒度就是对环

境变化敏感的粒度。这样对某一具体剖面就可以分别分析粗细不同组分的含量,进而探讨其代表的不同环境意义。从图中可以明显看出不同区域风成沉积物的环境敏感粒度组分存在较大的差异性。

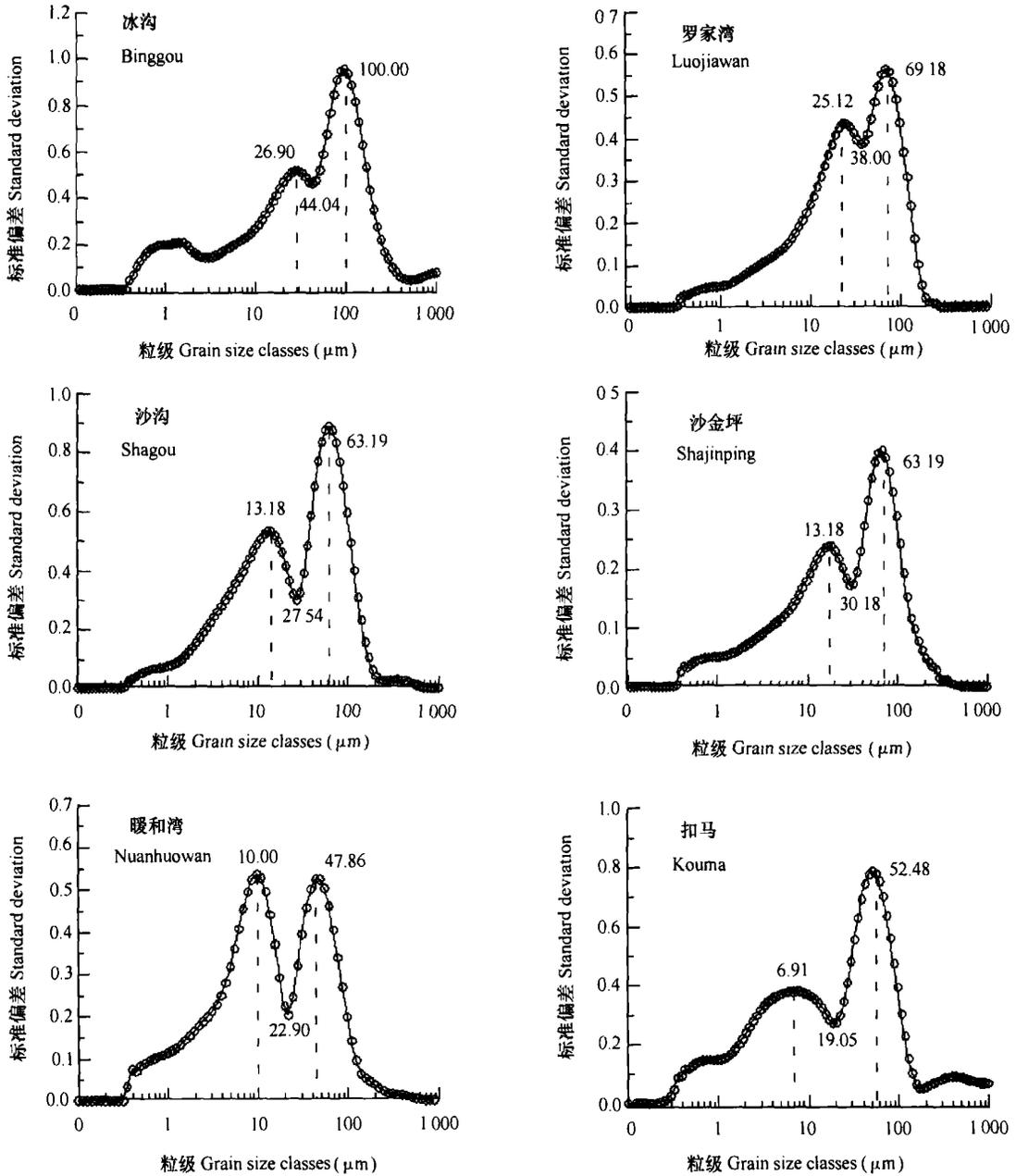


图 2 不同剖面粒度-标准偏差曲线

Fig. 2 Standard deviation curve of different grain size classes in soil profiles

风成堆积物粒度主要受控于源区范围、风力强度和风化作用三个因素<sup>[16]</sup>。其中,源区范围对我国北部、西北部地区的黄土沉积影响相对较大,而风化作用对东南部的古土壤的粒度组成变化有影响<sup>[19]</sup>。对于末次间冰期-冰期旋回时间尺度来看,风力强

度的变化可以认为是稳定的。就粗敏感粒度组分而言,除了暖和湾剖面粗、细敏感组分的标准偏差相当外,其他 5 个剖面的粗的敏感粒度组分的标准偏差大,这可能说明粗颗粒的含量更能反映沉积环境的变化,或者说是更敏感的粒度指标<sup>[15,18]</sup>。冰沟剖面

距目前腾格里沙漠南缘仅 15 km 左右,受源区远近的影响最大,敏感的粗颗粒组分的粒级大于  $44\ \mu\text{m}$ ,最敏感的粒级约  $100\ \mu\text{m}$ ,而罗家湾、沙沟和沙金坪剖面敏感的粗颗粒的粒级在  $63\ \mu\text{m}$  左右,说明砂粒的含量是一个重要的敏感指标,是粉尘搬运的一个阈值。据风沙动力学原理,风速愈大,则风力搬运的物质愈粗,沉积区沉积的物质也就愈粗。砂粒物质由于粒径较粗,一般只能以跃移的方式搬运,即很难被风吹扬至高空而以悬移的形式输送。在没有植被的沙漠内部,以跃移方式搬运的砂粒也可作远距离输送,但其一旦离开沙漠,在地表植被的作用下,可很快沉积下来<sup>[16]</sup>。所以砂的含量也被认为是沙漠黄土过渡带指示沙漠进退的一个代用性指标。风洞实验的研究也表明<sup>[2,25]</sup>,大于  $63\ \mu\text{m}$  的砂级颗粒组分每次只能上升到几 cm 到几 m 的高度并在水平方向上跃移同量级的距离;  $20\sim 63\ \mu\text{m}$  的粉砂颗粒组分与风速的线性相关较好,在一般的风暴中可上升到几百 m 之内,理论计算表明一次搬运距离在 1 000 km 之内,在空气中悬浮时间较短,搬运方式为近地面短距离悬移,风速减小便会因重力作用沉降,并依照粒径大小按搬运距离分选;几个  $\mu\text{m}$  的粘土级颗粒的搬运方式、高度和距离与砂、粉砂有实质性不同,它们一旦启动就很容易上升到高空并可被带到下风向的任一距离,其粒度在空间上的变化与搬运距离关系不大。

就细颗粒敏感组分而言,冰沟和罗家湾剖面分别为  $26.9\ \mu\text{m}$  和  $25.12\ \mu\text{m}$ ,沙沟和沙金坪为  $13.18\ \mu\text{m}$ ,而暖和湾为  $10\ \mu\text{m}$ ,到了河南西部的扣马剖面减小为  $6.91\ \mu\text{m}$ 。可能指示了一般尘暴或者冬季风的强度,其具体的环境意义有待于进一步探讨。因为细颗粒的搬运和形成机制更为复杂,搬运过程中的研磨和碰撞、沉积后的成壤作用等都可以产生细颗粒,而且细颗粒可以附着粗颗粒或者细颗粒聚合为团聚体一起搬运。

从粒度敏感组分的空间分布来看,也呈现一定的规律性。在陇西盆地顺着主导风向即西北—东南向,从腾格里沙漠南缘的冰沟、到罗家湾、沙金坪、至西秦岭北麓的暖和湾,环境敏感的粗、细颗粒组分逐渐变细。粗颗粒的峰值逐渐减小,从  $100\ \mu\text{m}$  逐渐降低到  $47.86\ \mu\text{m}$ ;细颗粒的峰值也存在逐渐减小的趋势,从  $26.90\ \mu\text{m}$  逐渐降低到  $10.00\ \mu\text{m}$ ;而且粗细颗粒的分界也逐渐减小,从  $44.04\ \mu\text{m}$  逐渐降低到  $22.90\ \mu\text{m}$ 。这也符合风成沉积物粒度顺搬运方向颗粒由粗变细的空间分异规律<sup>[19]</sup>,而区域性因素往往

会影响粒度的这种空间分异,沙沟剖面与扣马剖面就说明了这一点。

对位于河西走廊的沙沟剖面来说,环境敏感粗颗粒组分比罗家湾剖面的细,这是由于沙沟剖面尽管与腾格里沙漠较近(40 km),但其北部腾格里沙漠边缘的走向呈西北—东南方向,与粉尘搬运的主导风向平行,所以沙沟剖面的物源除了腾格里沙漠外,还包括河西走廊及其西北的沙漠。冰沟剖面与罗家湾剖面直接位于腾格里沙漠的下风向,沉积的粉尘颗粒较粗,环境敏感的颗粒组分也较粗。

对于黄土高原东南缘的扣马剖面来说,粗粒环境敏感组分比暖和湾剖面还粗,这是由于黄河及其支流的河漫滩提供了丰富的近源物质,已有的研究表明,在扣马剖面以东的邙山剖面在末次冰期沉积了 77.3 m 厚的马兰黄土<sup>[26]</sup>,邙山黄土自  $S_2$  发育以来,粒度和沉积速率比黄土高原其他剖面同时变大<sup>[27]</sup>。

## 2.2 单一样品环境敏感粒度组分的提取

对于每个子样来说,粒度频率曲线是粒度指标的最可靠的反映。所以,对同一子样的粒度频率曲线的分析也会提供该样品的敏感组分的部分信息。我们对沙金坪剖面 1 880 cm 处的样品进行了数学处理。对相邻两个粒级的百分含量与其对应的粒级的组中值进行线形拟合,其拟合直线的斜率的绝对值的大小可以反映不同粒级的变化程度,也就能反映其敏感程度。图 3 是沙金坪 1 880 cm 处的粒度频率曲线,图 4 为沙金坪 1 880 cm 处的粒度敏感组分,可以看出,敏感组分对应的粒级为  $17.37\ \mu\text{m}$ 、 $63.09\ \mu\text{m}$ ;与图 2 提取的敏感组分对应很好。两峰之间的谷对应的粒级为  $39.81\ \mu\text{m}$ 。较粗颗粒的界限与全样的界限存在差异。子样仅仅是总体的一部分,它仅能反映个体的特征。

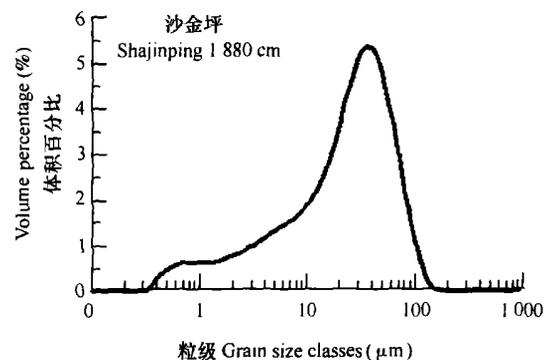


图 3 沙金坪 1 880 cm 处的粒度频率曲线

Fig. 3 Grain size distribution at 1 880 cm depth of Shajinping profile

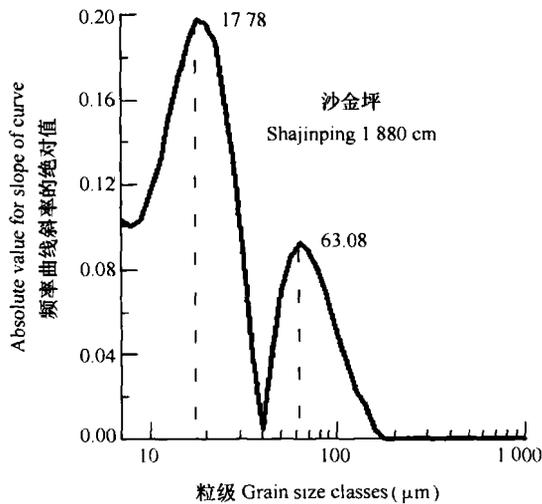


图4 沙金坪 1 880 cm 处的粒度敏感组分  
Fig. 4 Sensitive components of grain size at 1 880 cm depth of Shajinping profile

### 2.3 黄土古土壤环境敏感粒度组分的差异

对扣马剖面末次冰期旋回堆积的  $L_1$  和  $S_1$  的粒度-标准偏差分别进行了分析,结果如图 5,  $L_1$  的敏感组分与全剖面相似,而  $S_1$  的敏感组分与全剖面存在较大差异。说明末次间冰期沉积的古土壤  $S_1$  的环境敏感粒度组分不明显,这主要是由于  $S_1$  受到沉积后的成壤作用等所致。

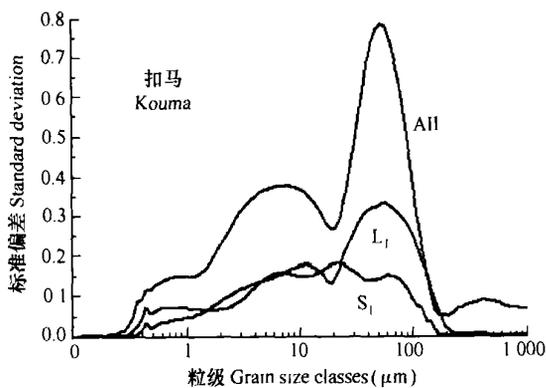


图5 扣马剖面全样与  $L_1$ 、 $S_1$  敏感组分的比较  
Fig. 5 Comparison of the population with  $L_1$  and  $S_1$  in sensitive component in Kouma profile

需要说明的是,文中环境敏感粒度组分的提取与对比是基于末次冰期旋回的风成陆源沉积,搬运动力单一或基本一致,沉积时段基本相似,具有一定的可比性,在古环境研究中是许可的。由于测年误差等因素的影响,绝对年代的控制和对比,可能是困难的和不现实的。

## 3 结论

通过对黄土高原西部等地的风成堆积物粒度的系统研究表明,通过计算粒度-标准偏差可以获得风成堆积物环境敏感组分,不同区域的环境敏感的粒度组分的范围明显不同,环境粒度敏感组分同样受到源区、沉积后作用等因素的影响。6 个剖面全样的粒度敏感组分主要包括粗细两个组分,顺着主导风向即西北—东南向,从腾格里沙漠南缘的冰沟、到罗家湾、沙金坪、至西秦岭北麓的暖和湾,环境敏感的粗、细颗粒组分逐渐变细。冰沟和罗家湾可能受源区的影响更大而使敏感组分偏粗,暖和湾和扣马剖面可能由于后期风化的影响较大而使敏感组分偏细。沙沟剖面由于物源的不同而使其环境敏感粗颗粒组分比罗家湾剖面的细,扣马剖面由于近源物质的加入而使其粗粒环境敏感组分比暖和湾剖面还粗,近源物质的加入可能是影响沉积物粒度的重要因素。所以,对某一剖面的环境敏感的粒度组分的提取不具有普适性,在进行粒度指标的分析时应按照粗细不同的敏感粒度组分进行分析,以获得更准确的气候环境变化的信息。

## 参考文献

- [1] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京:地质出版社,1978. 90~100. The Geology Team of Chengdu College of Geology. Application Analysis of Grain Size (In Chinese). Beijing: Geology Publishing House, 1978. 90~100
- [2] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits. London: Academic Press, 1987. 29~68
- [3] 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. 科学通报,2003,48(1):83~86. Sun Y B, Gao S, Li J. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1):83~86
- [4] 肖尚斌,李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分. 沉积学报,2005,23(1):122~129. Xiao S B, Li A C. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1):122~129
- [5] Hu X F, Lu H Y, Xu Q, et al. Red ratings for loess-paleosol sequences on China's Loess Plateau and their paleoclimatic implications. Pedosphere, 2004, 14(4):433~440
- [6] Prins M A, Postma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Makran continental slope. Marine Geology, 2000, 169:351~371
- [7] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environ-

- ments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 263 ~ 277
- [ 8 ] 刘秀明,王世杰,冯志刚,等. 石灰土物质来源的判别——以黔北、黔中几个剖面为例. *土壤*, 2004, 36(1): 30 ~ 36. Liu X M, Wang S J, Feng Z G, *et al.* Identification of origin of limestone soil—Case study of profiles in central and north Guizhou (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(1): 30 ~ 36
- [ 9 ] 刘建立,徐绍辉,刘慧,等. 参数模型在壤土类土壤颗粒大小分布中的应用. *土壤学报*, 2004, 41(3): 375 ~ 379. Liu J L, Xu S H, Liu H, *et al.* Application of parametric models to description of particle-size distribution in loamy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 375 ~ 379
- [ 10 ] Jackson M G, Oskarsson M, Trønnes R G, *et al.* Holocene loess deposition in Iceland: Evidence for millennial-scale atmosphere-ocean coupling in the North Atlantic. *Geology*, 2005, 33(6): 509 ~ 512
- [ 11 ] 胡雪峰,鹿化煜. 黄土高原古土壤成土过程的特异性及发生学意义. *土壤学报*, 2004, 41(5): 669 ~ 675. Hu X F, Lu H Y. Peculiarities in soil-forming processes of paleosols in the Loess Plateau and their pedogenic implication (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 669 ~ 675
- [ 12 ] Gao Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, *et al.* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416(14): 159 ~ 163
- [ 13 ] Pan B T, Burbank D, Wang Y X, *et al.* A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in north-west China. *Geology*, 2003, 30(11): 957 ~ 960
- [ 14 ] Xiao J L, Porter S C, An Z S, *et al.* Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 yr. *Quaternary Research*, 1995, 43: 22 ~ 29
- [ 15 ] 鹿化煜,安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(3): 278 ~ 283. Lu H Y, An Z S. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau (In Chinese). *Science In China (Series D)*, 1998, 28(3): 278 ~ 283
- [ 16 ] 丁仲礼,孙继敏,刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(1): 82 ~ 87. Ding Z L, Sun J M, Liu D S. Sediment index of coupling relation during contacting desert loess evolution (In Chinese). *Science In China (Series D)*, 1999, 29(1): 82 ~ 87
- [ 17 ] 潘保田,王均平,高红山,等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示. *科学通报*, 2005, 50(3): 255 ~ 261. Pan B T, Wang J P, Gao H S, *et al.* Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River running through the Sanmen Gorges (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 255 ~ 261
- [ 18 ] 汪海斌,陈发虎,张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 21 ~ 26. Wang H B, Chen F H, Zhang J W. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 21 ~ 26
- [ 19 ] 刘东生. 黄土与环境. 北京:科学出版社, 1985. 1 ~ 412. Liu D S. *Loess and Environment* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 1 ~ 412
- [ 20 ] 丁仲礼,余志伟,刘东生. 中国黄土研究新进展(三):时间标尺. *第四纪研究*, 1991, 11(4): 336 ~ 347. Ding Z L, Yu Z W, Liu D S. Time staff: A new progress in Chinese loess research (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 1991, 11(4): 336 ~ 347
- [ 21 ] 韩广,张桂芳,杨文斌. 呼伦贝尔沙地沙丘砂来源的定量分析——逐步判别分析在粒度分析方面的应用. *地理学报*, 2004, 59(2): 189 ~ 196. Han G, Zhang G F, Yang W B. A quantitative analysis for the provenance of dune sand in the Hulun Buir sandy land: Application of stepwise discriminant analysis to the granulometric data (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 189 ~ 196
- [ 22 ] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, *et al.* Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediments on the South China Sea (ODP Site 1144). *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 2002. 184
- [ 23 ] 秦小光,蔡炳贵,刘东生. 深海氧同位素第 3 阶段时期东亚季风区大气湍流特征. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 31 ~ 39. Qin X G, Cai B G, Liu D S. Characteristics of atmospheric turbulence in the eastern Asian Monsoon area during MIS 3 (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 31 ~ 39
- [ 24 ] 鹿化煜,安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. *科学通报*, 1997, 42(23): 2 535 ~ 2 538. Lu H Y, An Z S. Pretreatment methods influences on grain size measurement of loess (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(23): 2 535 ~ 2 538
- [ 25 ] Pye K, Tsao H. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in northern Negev, Israel. *Geological Society Special Publication*, 1987, 35: 139 ~ 156
- [ 26 ] 吴锡浩,蒋复初,肖华国,等. 中原邙山黄土及最近 200 ka 构造运动与气候变化. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(1): 75 ~ 81. Wu X H, Jiang F C, Xiao H G, *et al.* Mangshan loess on China's Central Plain and its response to tectonic movement and climate over the last 200 ka (In Chinese). *Science in China (Series D)*, 1999, 29(1): 75 ~ 81
- [ 27 ] 季军良,郑洪波,刘锐,等. 邙山黄土地层再研究. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 101 ~ 107. Ji J L, Zheng H B, Liu R, *et al.* Restudy on the stratigraphy of Mangshan loess (In Chinese). *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 101 ~ 107

## ANALYSIS OF GRAIN-SIZE POPULATIONS WITH ENVIRONMENTALLY SENSITIVE COMPONENTS OF LOESS DURING THE LAST INTERGLACIAL- GLACIAL CYCLE AND THEIR IMPLICATIONS

Xu Shujian<sup>1,2</sup> Pan Baotian<sup>1</sup> Gao Hongshan<sup>1</sup> Wang Junping<sup>1</sup> Guan Qingyu<sup>1</sup> Hu Chunsheng<sup>1</sup>

(1 *College of Resource and Environmental Science, Lanzhou University, MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou 730000, China*)

(2 *College of Geography and Tourism, Linyi Normal College, Linyi, Shandong 276005, China*)

**Abstract** Partitioning of subpopulations in bulk grain-size distribution and identification of their sedimentary implications has become a fundamental task for further studies on quantitative reconstruction of the sedimentary environment. The subpopulations were identified through calculating standard deviation of each grain-size class of the six profiles of the loess-paleosol formed during the last interglacial-glacial cycle in the west of the Loess Plateau, Hexi Corridor and the west of Henan Province, China. The peak values of standard deviation corresponded to the modal grain-sizes of each environmentally sensitive grain-size population. Findings of the study indicate that the two major grain-size populations (coarse and fine) varied from profile to profile, suggesting different sedimental implications. Distance of material resources and post-sedimental pedogenesis are the two major affecting factors on environmentally sensitive grain-size populations. The sensitive grain-size populations of Binggou and Luojiawan profiles were coarser because they were more influenced by the distance of material resources; whereas the sensitive grain-size populations of Nuanhuowan and Kouma profile were finer as they were more influenced by the pedogenesis. The results showed similar populations and subpopulations. The analysis of the standard deviation of each grain size class of Kouma profile demonstrated comparability between the population and  $L_1$ , which deposited during the last glacial period, and that big difference between the population and  $S_1$ , which deposited during the last interglacial period, suggesting close relationship with pedogenesis.

**Key words** Grain size; Sensitive components; Aeolian sediments; Last interglacial-glacial cycle